

doi:10.3969/j.issn.1674-117X.2012.01.002

# 城市低碳发展的研究框架和理论体系

张 旺<sup>1,2,3</sup>, 潘雪华<sup>1</sup>

(1. 中国社会科学院城市发展与环境研究所, 北京 100005;

2. 湖南工业大学 全球低碳城市联合研究中心, 湖南 株洲 412007; 3. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**[摘要]** 低碳城市作为一个整体系统, 其研究框架可从空间、时间和功能三个维度来展开。涵盖经济和社会两个方面的城市系统, 下含生产和生活两个子系统。自然资源、能源是城市系统的输入部分, 环境、排放是城市系统的输出部分。城市低碳发展理论体系的研究具体包括: 系统的结构和功能特征, 系统的空间性、地方性和全球性, 城市综合碳循环模型体系, 自然与人为双重影响的碳代谢过程, 不同空间尺度的城市碳排放和控制, 城市过去、现在和未来的碳排放清单与减排路径分析, 切实可行的碳管理措施, 城市低碳发展的方法论和技术支撑体系。

**[关键词]** 城市低碳发展; 系统论; 研究框架; 理论体系

**[中图分类号]** F291

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1674-117X(2012)01-0008-07

## Research Framework and Theoretical System of Low Carbon Urban Development

ZHANG Wang<sup>1,2</sup>, PAN Xuehua<sup>1</sup>

(1. The Chinese academy of social sciences urban development and environmental research institute, Beijing 100005;

2. Hunan university of global low carbon cities joint research center, hunan zhuzhou 412007;

3. The capital normal university environment and tourism resources institute, Beijing 100048)

**Abstract:** Urban low carbon development is a huge, complex but open theory and practical system, thus; a research framework and theoretical system from the perspective of system theory is established. Low carbon urban, as a whole system, can be studied from three dimensions of space, time and function. Economic and social natural resources and energy are the input of urban systems as well as environment and emissions is the output. The research of theoretical system of low-carbon urban development in the future should be rich in the following aspects: such as: the structural system and functional characteristics, space system, locality and globalize, city's comprehensive model system of carbon cycle, carbon metabolism process of double impact between nature and man-made, urban carbon emissions and control at different spatial scales, the past, present and future carbon emission inventories and emission reduction path analysis, practical carbon management measures, as well as the methodology of low-carbon urban development and technical support system.

**Key words:** low carbon urban development; system theory; research framework; theoretical system

城市是集聚人口、产业、建筑和交通物流等经济社会发展的空间载体, 它向低碳转型即规划和建设低碳城市是实现城市可持续发展的必由之路, 低碳城市规划与建设的实践迫切需要城市低碳发展理论的系统指导。由于城市低碳发展涉及到人口、

资源、环境、经济、社会和技术等诸多要素, 因此该领域的研究已成为城乡规划、地理科学、城市生态、环境科学与工程、城市经济学和社会学等多学科共同关注的焦点。

国外对城市低碳发展的研究主要侧重点在城

收稿日期: 2011-12-10

收稿日期: 国家十二五科技支撑计划基金资助项目(2011BAJ07B03-06), 湖南省教育厅重点基金资助项目(10A025)

作者简介: 张 旺(1974-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教师, 助理研究员, 博士生, 主要从事城乡规划、资源环境与可持续发展研究。

市碳排放驱动因素<sup>[1]</sup>、低碳城市循环与代谢<sup>[2]</sup>、低碳城市空间规划<sup>[3]</sup>、低碳城市环境管治<sup>[4]</sup>等四个方面,但在理论独创、模式构建和体系完善等方面的研究还显得不够充分;国内学者侧重对低碳城市的内涵<sup>[5]</sup>、战略<sup>[6]</sup>、规划<sup>[7]</sup>和途径<sup>[8]</sup>等宏观方面的研究,但缺少对城市家庭和社区、企业和园区等小尺度层面的碳排放定量研究。总之,国内外已有城市低碳发展的研究均处于探索阶段,还不够系统,具体表现在:以宏观抽象的定性概括为多,而符合MRV原则的研究较少;以城市层面的中观尺度居多,而针对城市群、大都市区等宏观层面及家庭、企业等微观层面的研究较少;以区域性、个案性的具体行动计划为多,但真正可推广、能响应全球气候变化的路径和制度较少。因而城市低碳发展的理论还有待进一步的完善和深入。基于此,再根据前人的研究成果,我们从学科交叉、系统科学的角度尝试提出城市低碳发展的研究框架和理论体系。

## 一 城市低碳发展的研究框架

为适应和减缓全球气候变化,低碳城市作为

技术应用、市场交易和政策实施的主要平台,是一个复杂的有机体系。其研究涵盖的内容十分广泛。在低碳城市这一巨系统之下又可细分为空间、时间、功能三个维度,三个维度并不是相互独立的关系,而是耦合互动、互为影响的(图1)。

### (一)时间维度

时间维度是从描述城市低碳发展的物质运动过程角度来展开研究,包括序列、进程、演变和趋势,即以时间序列推演为基础,综合历史轨迹、趋势分析与愿景预测对城市低碳发展水平作出科学评价和估测。一般运用经济社会发展与碳排放之间的“脱钩”等理论,基于情景分析法、碳足迹分析法、系统动力学(SD)模型、城市CA模型等研究模型和方法的优缺点,构建综合、发展的模型体系,来探析不同时间尺度的城市低碳发展状况。与时间维相匹配的是基于城市生命周期的低碳发展研究,具体包括低碳城市的界定、碳排放清单的编制和核算体系、低碳导向的规划、建设与管理这一系列过程。

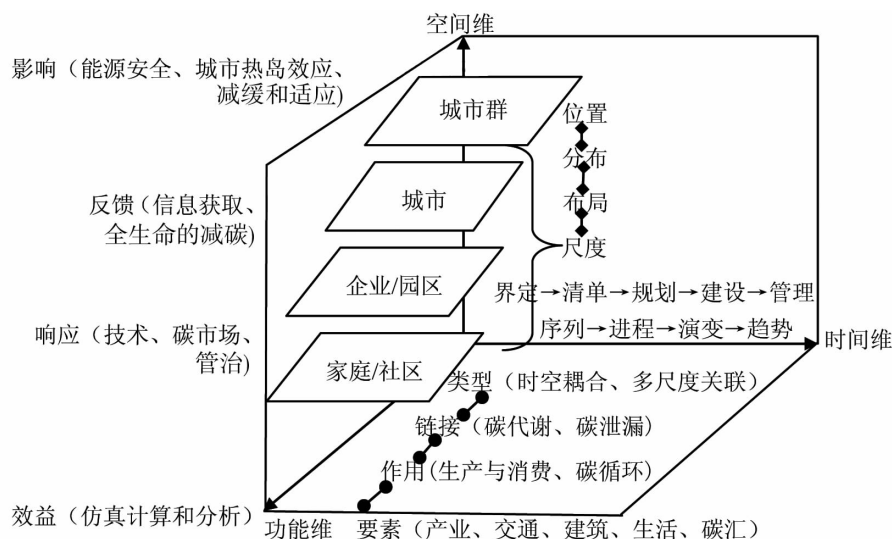


图1 城市低碳发展的研究框架图

### (二)空间维度

空间维度是从包容城市低碳发展及其现象的场所角度来展开研究,包括位置、分布、布局 and 尺度。其中位置除决定着城市所处的气候地带进而直接影响其综合总能耗外,也关系到其能源资源禀赋、能源结构和碳排放的绝对数量。人口、产业、交通和建筑等城市要素的分布、密度和布局等也是影响碳排放空间格局和分异的关键因子。而家庭—社区、企业—园区、城市层面、大都市区/城市群是

城市低碳发展研究的主要尺度和空间单元,其中家庭、企业空间能源消费活动是城市低碳排放的基本单元,居民的衣食住行、企业生产活动与城市碳排放密切相关;社区是居民能源利用、日常生活方式改变的背景,有助于居民低碳消费观念的形成;园区是企业的集聚区和碳排放的集中区,可以从生产源头控制城市碳排放量;城市个体是全球碳循环的基本单元,也是国家实现减排目标的基本行动者;城市群被视为城市发展过程中的高级空间组织,也是



如图2所示,城市低碳发展理论体系涉及的内容非常丰富。从系统的观点来研究是把某一个城市作为一个复杂巨系统,即城市系统(CS),下含生产和生活两个子系统,其中企业和园区是生产碳排放账户的空间单元,而家庭和社区则是生活也即消费碳排放账户的空间单元。城市系统(CS)又主要涵盖经济和社会两个方面,人口、建筑、交通、土壤、植被、科教、商贸、金融和管治等是其要素体现。城市系统(CS)内的子系统和要素之间相互耦合,彼此影响,成为碳排放的驱动因子。自然资源系统(NRS)、能源系统(ENS)是城市系统(CS)的输入,环境系统(ENV)、排放系统(EME)是城市系统(CS)的输出。碳管理和碳控制即减碳技术和政策措施,对城市系统(CS)的输入起到正反馈作用,而人为和自然过程中的碳代谢与碳循环则对城市系统(CS)的输出起到负反馈作用。城市之间、区域之间商品和贸易的流动造成的间接碳排放就表现为碳泄漏。多尺度、全方位的城市低碳发展方法论与技术支撑体系可以科学有效地指导城市向低碳化方向发展。总之,通过建立这样一套城市低碳发展的理论体系,旨在为城市朝着低碳的生产、生活与管理方式,促进经济、社会与自然的和谐可持续发展提供路径指引。

基于前文国内外理论研究基础,为进一步丰富和发展城市低碳发展理论体系,今后的研究应该在以下方面展开:

#### (一)城市低碳发展系统的结构和功能特征

从图2可看出,城市低碳发展系统由一定的结构组成,是许多子系统和要素构成的一个不可分割的有机整体。这些子系统和要素之间相互作用、相互关联与相互制约,他们之间相对稳定的耦合方式、组织秩序以及某些失控关系会通过一定的功能表现出来。城市低碳发展系统是一种非线性的反馈系统,除具备一般系统的整体性、层次性、复杂性等特征外,还具有高度的开放性、异质性、突变性、不确定性、不可逆性和动态扩展性。城市低碳发展系统的演化过程是自然生态系统与包含经济社会、生产生活等在内的人工生态系统两大系统相互耦合的结果,其中任何一个子系统和要素发生变化都可能对其它子系统和要素产生或短或长的影响,与之同时其功能也随之改变。

因而探讨城市低碳发展各子系统和要素之间的定量变化关系、空间格局的变化与过程、碳排放结构与调控措施等相关性理论是进一步深入研究的内容。如在分析交通能耗与城市密度的关系方面,在检验城市结构、功能分区以及产业结构分布方面,对于高密度发展何种程度上能够达到综合碳排放量平衡,都没给出具体的研究方法及量化指标<sup>[11]</sup>。小汽车增多与城市空间的紧凑发展之间存在着一定矛盾<sup>[12]</sup>,但对于高密度状态下的城区,交通拥挤造成的多余能耗及排放相对于远距离小汽车交通的排放哪方面更少<sup>[13]</sup>? 以及城市空间紧凑与综合能耗水平的降低之间是否存在着一个明显的门槛,怎样达到最优的状态? 再就是如何定量研究来论证城市环境影响程度与城市发展密度之间的关系<sup>[14]</sup>。

#### (二)城市低碳发展系统的空间性、地方性和全球性

城市低碳发展系统的空间性主要表现为水平方向的城市空间扩张与垂直方向的地表覆盖对碳代谢与碳循环的影响。根据城市的空间影响范围,城市系统可分为城市蔓延区(Urban Sprawl)和城市足迹区(Urban Footprint)<sup>[2]</sup>,城市蔓延区和足迹区的跨境交通、商贸和产品流动等活动影响城市水平方向的碳代谢。城市开放空间、城市非开放空间以及城市扩张过程会影响城市生态系统中的土壤成分、绿地结构<sup>[15]</sup>,进一步影响到城市垂直方向的碳循环。城市空间建成区、绿地、贫民区有不同的碳循环<sup>[16]</sup>。城市扩张导致了自然生态系统转换为城市生态系统<sup>[17]</sup>,引起植被、土壤碳库和碳通量变化<sup>[18]</sup>。城市土地利用的变化是碳排放重要的人为因素。所以分析和研究不同土地利用方式的碳储量及其碳通量,以及不同地类及其转化的碳排放效应,对于更大尺度的碳过程研究和区域之间的对比研究具有重要的意义<sup>[19]</sup>。

城市低碳发展系统的地方性表现为城市碳代谢与碳循环具有空间异质性,即不同区域的城市、不同城市的不同功能区碳排放的规模、驱动因子和变化及其潜在趋势都存在差异。因而加强对处于不同经济社会条件的城市、不同城市各功能区的碳排放机制研究,对于研究更大范围内的城市碳循环规律相当重要。

城市低碳发展系统的全球性研究内容主要包括城市碳管理和人类社会的可持续性、城市化碳排放对碳汇功能的影响、空前的城市化率<sup>[20]</sup>。在全球尺度上,城市化和全球碳循环是如何通过人口、富裕程度、能源及其他生物物理和社会经济机制相互作用的。<sup>[21]</sup>

### (三)城市综合碳循环模型体系

已有的碳循环模型多从经济学、环境学和系统学等学科中移植和衍生过来,目前对城市系统碳循环的评估也以单一计算方法为主,对城市系统碳循环过程进行整体综合评估和模拟的模型还较少。因此要构建城市系统碳循环及其影响的综合评价模型,不仅要考虑生物和物理特性,也要包括城市系统的人文因素,从自然和人文两个角度构建城市碳通量的估算模型,并从城市碳库、城市输入通量和输出通量等方面来整体考虑城市的碳通量。<sup>[21]</sup>这需要一方面调查研究城市有关能源使用、产业、交通和建筑排放、植被和土壤碳通量等方面的数据,另一方面也需开展对影响城市碳循环的经济社会和生物物理等驱动因子的跨学科研究。只有如此,才能更好地了解不同区域城市系统碳循环的过程、方向和机理,为制定切实科学的碳管理措施提供定量依据和模拟仿真。

### (四)自然与人为双重影响的碳代谢过程

城市物质代谢的主要目的是为了分析和了解与人类有关的物质和能量的流动,重点关注社会经济系统的物质数量与质量的进出及其对生态环境产生的影响。<sup>[22]</sup>城市碳代谢为理解城市水平的碳流动提供了概念性框架,<sup>[2]</sup>它研究人类活动直接和间接产生、产品整个生命周期累积的碳排放总量。<sup>[23]</sup>当前宏观层面的碳代谢研究多从人均水、污水、交通、能源和原料等领域展开,但城市代谢方法未考虑到城市蔓延区和足迹区的植被及土壤的垂直碳通量自然过程的碳代谢研究较为深入;<sup>[2]</sup>而微观方面的碳代谢研究则主要是从家庭层面研究自然资源的流入与流出通量。<sup>[22]</sup>这种基于宏微观层面展开的碳代谢研究,为分析自然生态、经济社会双重因素对碳循环的空间异质性影响提供了思路,特别有助于解释不同经济社会结构和生活方式对人为因素碳循环的影响,也是精确测度城市碳排放量的科学基础。

### (五)不同空间尺度的城市碳排放和控制

空间尺度上,已有碳排放和控制的研究多集中在发达国家城市个体层面,因而未来一方面应向小尺度的家庭和社区、企业和园区延伸,另一方面向更大尺度的都市区、城市群等层面扩展,研究地域也要从少数发达国家拓展至发展中国家。城市的空间扩展和新城市的产生,不断侵占原有地域生态系统的边界,区域城市就发展成为城市区域,即大都市区和城市群。大都市区/城市群被看作城市发展过程中的高级空间组织,也成为综合控制和管理城市碳排放的高级空间单元。因而要对城市和区域进行合理的碳管理,必须要从城市—区域—全球的综合视角,将碳管理和城市发展、城市部门和地方实际结合起来。<sup>[24]</sup>不同尺度的社区(城市社区、部门社区、兴趣社区、智能手机社区)可以将经济—环境—社会目标整合起来,<sup>[25]</sup>为个人提供低碳行为的氛围与规范;<sup>[26]</sup>低碳社区规划可以合理安排住房密度,有效利用交通设施,弥补综合规划的缺陷,日渐成为规划过程的主题。<sup>[27]</sup>

### (六)城市过去、现在和未来的碳排放清单与减排路径分析

时间序列上,首先区分处于不同经济社会发展阶段,再定量估测过去和当前城市的碳源和碳汇,编制碳排放清单,探寻可行的减碳技术和政策方面路径;运用脱钩等理论从基准、最优和低碳三种假设条件来分析低碳城市的未来发展情景。随着城市演化带来的工业化、城镇化进程推进,碳排放的结构、功能和控制都发生变化,所以在时间尺度上分析碳转换的过程与机理值得深入探讨。

### (七)切实可行的碳管理措施

城市碳管理要解决的主要科学问题有<sup>[21]</sup>:1. 在全球尺度上,城市化和全球碳循环是怎样通过人口、富裕程度、能源及其他生物物理和社会经济机制相互作用的;2. 不同城市的不同碳模式的基本驱动因子(如地理条件、社会经济因素、历史遗存/模式等)及其潜在结构是什么。3. 影响城市碳减排的管理策略有哪些。如:区域高效碳管理中的权衡和协作有哪些,在城市及区域碳管理中,碳管理制度和结构的作用是什么。

碳管理的关键切入点在社会和人文两个角度:调节城市规划、土地和交通基础设施以及城市化及

其规划之间的关系,是将碳管理与城市发展相整合的关键过程,未来几十年城市设计和管理方法将对未来碳循环产生巨大影响<sup>[28]</sup>;城市政策是追求可持续发展和实现低碳排放的有效手段<sup>[29]</sup>;城市清洁发展机制(CDM)<sup>[30]</sup>、碳排放交易计划(ETS)<sup>[31]</sup>、城市区域碳管理(URCM)<sup>[32]</sup>等全球、地方气候政策需要落实到区域、城市层面,碳税<sup>[33]</sup>、限额交易、碳信用额等是常用的政策工具<sup>[34]</sup>;对于碳金融、碳贸易等碳市场而言,均衡有效的投资、投资组合可使CO<sub>2</sub>有效减排<sup>[35]</sup>,碳金融风险也为不同气候政策提供了扩大交流的机会<sup>[36]</sup>;而研发和“干中学”两种不同驱动力的技术进步作用,也对应着不同的政策情景和碳税模式<sup>[37]</sup>;从管治层面说,政府、企业、个人起着重要的作用,考虑市场环保论、运用新环境政治工具<sup>[38]</sup>;如何计算分析和协调处理城市之间、区域之间的商品和服务流动所引起的间接碳排放即碳泄漏问题。

#### (八)城市低碳发展的方法论和技术支撑体系

城市低碳发展研究是一个新兴的交叉学科领域,急需建立起自己的一套方法学和技术支撑体系,其主要内容应涵盖:1. 城市低碳发展理论框架、数据与技术支持系统;2. 已有城市低碳发展模型的整合、新型适用的综合模型体系构建;3. 低碳城市规划技术方法和指标体系;4. 城市碳管理的制度设计与实施机制;5. 基于3S技术应用的综合研究体系;6. 城市低碳发展实践模式的提炼与借鉴。

### 三 结论与讨论

城市低碳发展是一个涉及人口、资源、环境、经济、社会和技术等诸多方面的整体系统,其研究框架可从时间、空间和功能三个维度展开。城市作为经济和社会两个方面的复杂巨系统,下含生产和生活两个子系统。自然资源、能源是城市系统的输入,环境、排放是城市系统的输出。碳管理和碳控制对城市系统的输入起正反馈作用,而碳代谢与碳循环则对城市系统(CS)的输出起负反馈作用。

正处于经济社会转型期的中国各城市发展历史、所处阶段和社会文化差异明显,所以基于时空耦合的城市碳排放和控制过程与机理值得深入探讨;又由于中国城市发展模式区别于西方发达国家,因此有必要创建一套适合我国区域发展的低碳

城市发展的研究框架和理论体系。

#### 参考文献:

- [1] Lebel L, Garden P, Banaticla M R N, et al. Integrating carbon management into the development strategies of urbanizing regions in Asia [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 61–81.
- [2] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems [J]. *Ecological Modeling*, 2008, 216(2): 107–113.
- [3] Jenny Crawford, Will French. A Low-carbon Future: Spatial Planning's Role in Enhancing Technological Innovation in the Built Environment [J]. *Energy Policy*, 2008, (12): 4575–4579.
- [4] Gibbs D. Prospects for an environmental economic geography: Linking ecological modernization and regulation approaches [J]. *Economic Geography*, 2006, 82(2): 193–215.
- [5] 庄贵阳. 低碳经济引领世界经济发展方向[J]. *世界环境*, 2008, (2): 34–36.
- [6] 毕军. 后危机时代中国低碳城市的建设路径[J]. *南京社会科学*, 2009, (11): 12–16.
- [7] 叶祖达. 碳排放量评估方法在低碳城市规划之应用[J]. *现代城市研究*, 2009, 11: 20–26.
- [8] 杨国锐. 低碳城市发展路径与制度创新[J]. *城市问题*, 2010, (7): 44–48.
- [9] 秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先等. 国外低碳城市研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(12): 1459–1469.
- [10] Wiedmann T, Minx J. A definition of “Carbon Footprint” // Pertsova C C. *Ecological Economics Research Trends* [M]. Hauppauge NY: Nova science publishers, 2007.
- [11] Peter N, Jerry K. Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence [M]. Washington, DC: Island Press, 2007: 94–111.
- [12] Jeff K, Gang H. Transport and Urban form in Chinese Cities: An International Comparative and Policy Perspective with Implications for Sustainable Urban Transport in China [J]. *DISP* 151. 2002, (4): 4–14.
- [13] [美] 奥利弗·吉勒姆. 无边的城市: 论战城市蔓延 [M]. 叶齐茂, 倪晓晖译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 115–119.
- [14] Halyan C, Beisi J, et al. Sustainable Urban Form for Chinese Compact Cities: Challenges of a Rapid Urbanized E-

- conomy. *Habitat International*[J]. 2008, (32):28-40.
- [15] Pataki D E, Alig R J, Fung A S, et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(11):1-11.
- [16] Svirejeva H A, Schellnhuber H J. Modeling carbon dynamics from urban land conversion: Fundamental model of city in relation to a local carbon cycle[J]. *Carbon Balance and Management*, 2006, 1(8):1-9.
- [17] Svirejeva H A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: using the model based on the population density distribution [J]. *Ecological Modeling*, 2008, 216(2):208-216.
- [18] Pouyata R, Groffman P, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(s1):107-118.
- [19] 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧等. 城市系统碳循环与碳管理研究进展[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(10):1847-1859.
- [20] Dhakal S. The Global Carbon Project and urban and regional carbon management [EB/OL]. <http://www.gcp-urcm.org>.
- [21] URCM. URCM Science [EB/OL]. [http://www.gcp-urcm.org/Main/URCM Science](http://www.gcp-urcm.org/Main/URCM%20Science).
- [22] 马其芳, 黄贤金, 于术桐. 物质代谢研究进展综述[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1):141-152.
- [23] Greening L A, Ting M, Davis W B. Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: Trends from 10 OECD countries for the period 1971-1993[J]. *Energy Economics*, 1999, 21(4):331-361.
- [24] Canan P, Crawford S. What can be learned from champions of ozone layer protection for urban and regional carbon management in Japan? [R] Global Carbon Project, 2006:16-17.
- [25] Roseland M. Sustainable community development: Integrating environmental, economic, and social objectives [J]. *Progress in Planning*, 2000, 54(2):73-132.
- [26] Heiskanen E, Johnson M, Robinson S, et al. Low-carbon communities as a context for individual behavioral change [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(2):1-10.
- [27] Raco M. Sustainable development, rolled-out neoliberalism and sustainable communities [J]. *Antipode*, 2005, 37(2):324-347.
- [28] Munksgaard J, Wier M, Lenzen M, et al. Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1/2):169-185.
- [29] McEvoy D, Gibbs D C, Longhurst J W S. Urban sustainability: problems facing the "local" approach to carbon-reduction strategies. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 1998, 16(4):423-432.
- [30] Streck C. New partnerships in global environmental policy: The clean development mechanism. *Journal of Environment & Development*, 2004, 13(3):295-322.
- [31] Steven S, Sijm J. Carbon trading in the policy mix. *Oxford Review of Economic Policy*, 2003, 19(3):420-437.
- [32] Dhakal S, Betsill M M. Challenges of Urban and Regional Carbon Management and the Scientific Response. *Local Environment*, 2007, 12(5):549-555.
- [33] Baranzini A, Goldemberg J, Speck S. A future for carbon taxes. *Ecological Economics*, 2000, 32(3):395-412.
- [34] While A, Jonas A E G, Gibbs D. From sustainable development to carbon control: Eco-state restructuring and the politics of urban and regional development. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2009, 35(1):76-93.
- [35] Caetano M, Gherardi D, Ribeiro G. Reduction of CO<sub>2</sub> emission by optimally tracking a pre-defined target. *Ecological Modeling*, 2009, 220(19):2536-2542.
- [36] Hultman N E. Geographic diversification of carbon risk: A methodology for assessing carbon investments using eddy correlation measurements. *Global Environmental Change*, 2006, 16(1):58-72.
- [37] Zwaana B, Gerlagha R, Klaassen G, et al. Endogenous technological change in climate change modeling. *Energy Economics*, 2002, 24(1):1-19.
- [38] Bailey I. Market environmentalism, new environmental policy instruments, and climate policy in the United Kingdom and Germany. *Annals of the Association of American Geographers*, 2007, 97(3):530-550.

责任编辑:徐 蓓